فیزیک کوانتوم به زبان ساده

در سال ۱۸۰۳، دانشمندی انگلیسی به نام توماس یانگ (Thomas Young) ، آزمایش قابل توجهی انجام داد. یانگ که به هیروگلیف‌های مصری بسیار علاقه‌مند بود و در استخراج آنان نیز همکاری داشت، درباره‌ی ماهیت نور تحقیق می‌کرد. آزمایش وی، تحولی در فیزیک ایجاد کرد که در نهایت باعث دگرگونی قوانین حرکت آیزاک نیوتون شد، قوانینی که یک قرن پیش از یانگ ارائه شده بود. این آزمایش همچنین یکی از بزرگترین رازهای جهان را نمایان ساخت: راز کوانتوم.

بدون شک، معمای رمزآلود فیزیک کوانتوم، معمای عمیقی است. اگر کسی یک مار بزرگ دریایی واقعی بگیرد یا به یک دایناسور زنده بربخورد، رسانه‌ها چندین ماه به این موضوع می‌پردازند. کنار آب‌سردکن‌های تمام ادارات جهان، درباره‌ی این کشف جدید صحبت می‌شود. با این حال، هر چند چنین یافته‌ای می‌تواند بسیار تکان‌دهنده باشد، اما تغییر چندانی در جهان‌بینی ما ایجاد نمی‌کند. ما می‌دانیم که خزندگان غول‌پیکر آبزی و دایناسورها در گذشته‌های دور می‌زیسته‌اند. برایمان بسیار تعجب‌برانگیز می‌شد اگر می‌فهمیدیم این موجودات به نحوی توانسته‌اند بی‌آنکه که توسط دنیای علم کشف شوند، این همه سال زنده بمانند. اما در هر حال، این کشف، تغییر چندانی در نظریه‌ی تکامل ایجاد نمی‌کند.

ولی رازی که در بطن فیزیک کوانتوم نهفته، به طور غیر مستقیم، درک ما را از حقیقی بودن جهان و هر آنچه در آن است (از جمله خود ما)، مورد هدف قرار می‌دهد. به علاوه، ایده‌ی مارهای غول‌پیکر دریایی و دایناسورها، بسیار خیالی و غیرمحتمل می‌باشد، حال آن‌که تئوری فیزیک کوانتوم یکی از تئوری‌هایی است که از پیکار آزمایشات فراوانی در عرصه‌ی علم، جان سالم به در برده است. علی‌رغم مشخصه‌های نامأنوس فیزیک کوانتوم، در صحت این نظریه، تردید چندانی باقی نمانده. همان‌طور که دنیل ام. گرینبرگر بیان کرده است که انیشتین می‌گفت اگر علم مکانیک کوانتوم درست باشد، جهان جای بسیار عجیبی است. انیشتین راست می‌گفت. جهان جای بسیار عجیبی است.

آزمایش دو شکاف (The Double Slit Experiment)

برای صحبت درباره‌ی فیزیک کوانتوم، بهترین کار این است که با آزمایش یانگ در سال ۱۸۰۳ شروع کنیم. در آن زمان، دانشمندان می‌خواستند بدانند آیا نور از نوعی ذره تشکیل شده یا این که از طریق ماده‌ی ناشناخته‌ی دیگری، به صورت موجی حرکت می‌کند (مانند امواجی که در آب حرکت می‌کنند). در آزمایش یانگ، از یک منبع ریز نور و یک صفحه استفاده شده بود. یانگ، میان این دو شیء، یک مانع با دو شیار نازک عمودیِ موازی با یکدیگر قرار داد.

یانگ می‌دانست در صورتی که نور، فقط جریانی از ذرات ریز باشد، باید از هر کدام از شکاف‌ها گذشته و روی صفحه‌ی پشت سوراخ‌ها جمع شود.

این دقیقاً همان چیزی بود که با پوشاندن یکی از شکاف‌ها و باز گذاشتن شکاف دیگر، اتفاق افتاد. یک نوار عمودی باریک از نور، روی صفحه‌ی پشت سوراخ ظاهر شد. یانگ مسلماً انتظار داشت وقتی شکاف دیگر را هم باز کرد، دو نوار باریک نوری ببیند، اما این طور نشد.

بیشتر بخش‌های صفحه را مجموعه‌ای از نوارهای عمودی روشن و تاریک پر کرد. یانگ معنای این مشاهده را دریافت. نور، مثل یک موج عمل می‌کند و از هر دو شکاف می‌گذرد. بعد از گذشتن از میان شکاف‌ها، امواج به شکل نیم‌دایره پخش می‌شوند و با یکدیگر تداخل می‌کنند. به این ترتیب، وقتی دو قله‌ی موج با هم تلاقی می‌کنند، باعث تقویت یکدیگر می‌شوند و وقتی یک قله‌ی موج و یک دره‌ی موج با هم تلاقی می‌کنند، هر دو خنثی می‌شوند. در نتیجه، مجموعه‌ای از نوارهای روشن و تاریک روی صفحه دیده می‌شود. دانشمندان، این پدیده را الگوی تداخل (interference pattern) می‌نامند، زیرا از تداخل امواج با یکدیگر حاصل می‌شود.

پس نور بدون شک یک موج بود. در طی سال‌ها، دانشمندان به دنبال ماده‌ای بودند که امواج نور از طریق آن حرکت می‌کنند (و آن را ether یا واسط نور می‌نامیدند)، اما نمی‌توانستند به آن دست یابند. به علاوه، شواهدی نیز موجود بود که نشان می‌داد نور به صورت نوعی ذره حرکت می‌کند (که بعدها به آن فوتون گفته شد). در نهایت چنین نتیجه گیری شد که فوتون‌ها ماهیتی دوگانه دارند و به صورت موج و ذره عمل می‌کنند. با این حال، دانشمندان هنوز هم از خود می‌پرسیدند اگر بتوانند فوتون‌ها را یکی یکی از دو شکاف بگذرانند، چه چیزی رخ خواهد داد.

سرانجام، منبع نوری اختراع شد که قادر بود هر بار تنها یک فوتون آزاد کند. آزمایش دو شکاف یانگ دوباره انجام گرفت. اما این بار به جای صفحه‌ی عادی، از کاغذ عکاسی استفاده شد، زیرا یک فوتون، کم‌نورتر از آن است که روی صفحه دیده شود. حال آن که بعد از عبور میلیون‌ها فوتون از شکاف‌ها (به صورت تک تک)، الگوی مورد نظر بر روی کاغذ عکاسی قابل مشاهده می‌گردید.

با ظاهر کردن عکس، همان الگوی تداخل پیشین مشاهده شد. دانشمندان این‌گونه نتیجه گرفتند که هر یک از فوتون‌ها به صورت موجی حرکت کرده، به طور همزمان از میان دو شکاف رد شده و با خودشان تداخل داشته‌اند و تنها هنگامی که سرانجام با کاغذ عکاسی برخورد کرده‌اند، به صورت ذره‌ای در موقعیت خاص ظاهر شده‌اند، و این بسیار عجیب بود.

دانشمندان تصمیم گرفتند کنار شکاف‌ها، ردیابِ فوتون کنار قرار دهند تا مسیر واقعی فوتون را مشاهده کنند. آن‌ها موفق شدند، ولی وقتی این آزمایش را انجام دادند، الگوی تداخل ناپدید شد و تنها دو خط باریک (پشت هر سوراخ یکی)، روی صفحه ظاهر شد. ظاهراً فوتون‌ها «می‌دانستند» که در معرض مشاهده شدن قرار دارند و به همین دلیل، به جای این که به صورت موجی عمل کنند، رفتار ذره‌ای پیش گرفته‌اند!

دانشمندان سپس تصمیم گرفتند که ردیاب فوتون را در جهتی از صفحه قرار دهند که با منبع نور فاصله‌ی بیشتری داشته باشد، تا به این ترتیب فوتون، فقط بعد از عبور از میان شکاف دیده شود. اما تغییری در نتیجه حاصل نشد. باز هم ظاهراً فوتون پیش از رسیدن به صفحه، «می‌دانست» در سمت دیگر آن یک ردیاب وجود دارد و به همین دلیل پیش از عبور از شکاف‌ها، به ذره تبدیل می‌شد.

سرانجام، دانشمندی به نام جان ویلر (John Wheeler) آزمایشی پیشنهاد کرد که طی آن، صفحه می‌توانست درست در آخرین لحظه‌ی پیش از برخورد فوتون، با یک دستگاه ردیاب نوری جایگزین شود، به این ترتیب می‌شد فهمید فوتون از کدام شکاف عبور کرده است. تصمیم درباره‌ی کنار کشیدن یا نکشیدن صفحه، باید بعد از عبور فوتون از میان شکاف گرفته می‌شد. در زمانی

که ویلر این آزمایش را مطرح کرد، انجام آن از لحاظ فنی غیرممکن بود. اما چند سال بعد، امکان انجام آزمایش به وجود آمد. نتیجه‌ی آزمایش چنین بود: هنگامی که صفحه در جای خود قرار داشت، فوتون طبق الگوی تداخل رفتار می‌کرد، حال آن که اگر صفحه در لحظه‌ی آخر، برداشته می‌شد تا اطلاعات مربوط به این که از کدام شکاف عبور کرده، به دست آید، فوتون طبق الگوی تداخل رفتار نمی‌کرد. گویا فوتون می‌دانست هنگام رسیدن به شکاف چگونه عمل کند، هر چند که تصمیم درباره‌ی برداشتن یا برنداشتن صفحه در لحظه‌ی آخر گرفته می‌شد. ظاهراً یا فوتون می‌توانست آینده را پیش‌بینی کند یا این‌که تصمیم درباره‌ی قرارگیری صفحه، می‌توانست گذشته را تغییر دهد.

دانشمندان این طور نتیجه گرفتند که در نظریه‌ی کوانتوم، جایی برای علیت وجود ندارد. گویا اتفاقاتی که در زمان حال می‌افتند، می‌توانند گذشته را تغییر دهند، و این اوج غرابت کوانتوم بود.

اگر خواندن این مطالب، شما را آشفته کرده، نگران نباشید. افراد زیادی از این مسئله آشفته شده‌اند، از جمله آلبرت انشتین.

نور ستارگان، درخشش ستارگان

امشب بیرون بروید و ستارگان را تماشا کنید. اگر زمستان باشد (در نیکره‌ی شمالی)، حتماً خواهید توانست صورت فلکی شکارچی (یا جبار) را ببینید. تشخیص این صورت فلکی آسان است، زیرا سه ستاره در یک خط، کمربند شکارچی را تشکیل می‌دهند. به ستاره‌ی وسطی نگاه کنید. او یک ستاره‌ی ابرغولِ سفید-آبی به نام اپسیلون جبار (Alnílam) است که ۱۳۰۰ سال نوری از ما فاصله دارد. وقتی به این ستاره نگاه می‌کنید، چه اتفاقی می‌افتد؟ بر اساس بسیاری از کتاب‌ها، هزار و سیصد سال پیش- اوایل قرون وسطی در اروپا- الکترونی برانگیخته در یکی از اتم‌های هیدروژن موجود در لایه‌های بیرونی این ستاره، یک ذره‌ی انرژی آزاد کرده است: یک فوتون.

فوتون آزاد شده از اپسیلون جبار، با سرعت نور، حدوداً ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر در ثانیه، در جهت زمین حرکت کرده است. اگرچه فوتون‌ها چندان تحت تأثیر جاذبه قرار نمی‌گیرند، اما سیارات، ستارگان و سایر اجرام آسمانی که در مسیر فوتون یاد شده قرار دارند، به طور خفیفی بر آن تأثیر گذاشته و در خلاء فضا، مسیری خاص به آن می‌دهند. با نزدیک شدن به زمین، فوتون، بدون برخورد با مولکول‌های اتمسفر، از آن‌ها می‌گذرد. درست وقتی به آسمان نگاه کردید، این فوتون توسط شما دریافت می‌شود. این فوتون (همراه بسیاری فوتون‌های دیگر)، شبکیه را که درست پشت چشمتان قرار دارد، تحریک می‌کند، پیغامی به مغز شما فرستاده می‌شود و شما در مغزتان نور ستاره را می‌بینید. این سیر حوادث، بسیار جالب است، منتها، با توجه به تئوری کوانتوم، در حقیقت این همان چیزی نیست که اتفاق می‌افتد. به هیچ وجه.

هیچ کس دقیقاً نمی‌داند در سطح کوانتوم چه اتفاقی می‌افتد، با این حال، چند تفسیر از نظریه‌ی کوانتوم وجود دارد که می‌توانند به ما در فهم مسئله کمک کنند. معروف‌ترین آن‌ها تفسیر کُپنهاگ (Copenhagen Interpretation)نامیده می‌شود، زیرا قسمت عمده‌ی آن توسط نیلز بور (Níels Bohr) ، فیزیکدان اهل کپنهاگ، ارائه شده است. دانشمندان و مهندسان، سال‌هاست از کپنهاگ به عنوان روشی استاندارد جهت درک دنیای کوانتوم استفاده می‌کنند. تفسیر کپنهاگی نظریه‌ی کوانتوم، مشاهده شدن اپسیلون جبار توسط شما را این گونه توضیح می‌دهد:

آنچه که حدود ۱۳۰۰ سال پیش، اتم هیدروژن را ترک کرد، فوتون نبود، بلکه یک موج احتمال بود. این موج، بیانگر مکان

احتمالی فوتون نبود، بلکه بیانگر این احتمال بود که در صورت مشاهده شدن فوتون، این اتفاق در چه مکانی روی خواهد داد. موج با سرعت نور به بیرون حرکت کرد، اما نه به سوی زمین، بلکه به شکل کُره‌ای که با سرعت نور بزرگ و بزرگ‌تر می‌شد. سیارات، ستارگان و سایر اجرامِ نزدیک به آن، بر مکان احتمالی مشاهده‌ی شدن فوتون تأثیر گذاشتند، اما هنوز این امکان وجود داشت که فوتون در هر جایی از کره‌ی در حال انبساط، ظاهر شود. موج/کره، ۱۳۰۰ سال بزرگ شد، تا این که قطری برابر ۲۶۰۰ سال نوری پیدا کرد، یعنی ۱۵۲۵۰۸۰۹ بیلیون مایل. جبهه‌ی موج از اتمسفر زمین گذشت. درست در این لحظه، شما چشمتان را بر روی اپسیلون جبار متمرکز کردید و جبهه‌ی موج با سلول‌های شبکیه‌ی چشم شما درگیر شد. سپس، جایی میان شبکیه‌ی چشم شما که با موج درگیر شده و مغزتان که ستاره را دیده، این واقعه رخ داد.

بلافاصله، موج احتمال به قطر ۲۶۰۰ سال نوری، از میان رفت و فوتون در برخورد با شبکیه‌ی چشم شما، ظهور کرد. اگر شما در لحظه‌ی مناسب به آسمان نگاه نکرده بودید، شاید فوتون، چند ثانیه‌ی دیگر، در سوی دیگر اپسیلون جبار، توسط ناظر بیگانه‌ای در یک سیاره‌ی دیگر با فاصله‌ی هزاران سال نوری، از هم می‌پاشید. اما مشاهده شدن فوتون توسط شما در کره ی زمین، برای همیشه این احتمال را از میان برد.

وقتی شما این فوتون را دیدید، سرنوشتی منحصر به فرد برایش رقم خورد. مسیری ایجاد شد تا او از آن اتم هیدروژن در اپسیلون جبار، به چشم شما برسد.

شاید این طور به نظر بیاید که نابودی چیزی با وسعت ۲۶۰۰ سال نوری غیرممکن است، زیرا لازمه‌ی آن، پیشی گرفتن از سرعت نور می‌باشد. اما این مورد، تنها یکی از موارد متعددی است که در آن، نظریه‌ی کوانتوم، حداکثر سرعت کیهانی را به چالش می‌طلبد. این مسئله نیز، انشتین را عمیقاً آشفته کرد.

دو فرزند انشتین

گفته می‌شود در اوایل قرن بیستم، انشتین صاحب دو فرزند شد– دو نظریه‌ی بزرگ فیزیک. می‌گویند او یکی را فرزندانش را دوست داشت (نسبیت) و از دیگری متنفر بود (فیزیک کوانتوم).

چه چیزی در فیزیک کوانتوم، او را بر می‌آشفت؟ اول از همه، غیر قابل پیش‌بینی بودن آن. اگر قرار باشد یک تفنگ را تنظیم کنید و آن را به هدف بزنید، با معلوم بودن سرعت و جهت گلوله، تعیین مسیر آن بعد از خروج از لوله‌ی تفنگ، بسیار ساده است. اما فوتون این طور نیست. همان‌طور که مثالِ ما درباره‌ی موج نورِ رهسپار شده از یک ستاره‌ی دوردست، نشان داد، فوتون به صورت موج احتمال حرکت می‌کند. فوتون ممکن است هرجایی در مسیر حرکت موج، ظاهر شود. هر چند، احتمال ظهور آن، در بعضی مکان‌ها بیشتر است. این باعث شد انشتین به طعنه بگوید که باورش نمی‌شود «خدا با هستی تخته نرد بازی کند.» انشتین کمک کرد نظریه‌ی کوانتوم به دنیا بیاید، ولی بسیار از آن آشفته گشت.

دومین نکته‌ای که انشتین را آزار می‌داد، این ایده بود که با توجه به کپنهاگ، یک جسم پیش آن‌که مورد مشاهده قرار گیرد، تنها به شکل موج احتمال وجود دارد. شاید وقتی حرف از یک فوتون باشد، این مسئله چندان مهم به نظر نرسد، چون بسیار بسیار کوچک است. اما این تنها فوتون‌ها نیستند که از قوانین فیزیک کوانتوم پیروی می‌کنند، بلکه الکترون‌ها، پروتون‌ها، اتم‌ها و مولکول‌ها نیز مشمول این قوانین هستند. همه‌ی آن‌ها پیش از مشاهده شدن، تنها موج‌اند و آزمایش دو شکاف، با موادی به

بزرگی مولکول‌های فولرن (Fullerene) که ۶۰ اتم کربن دارند، انجام شده است.

در نهایت اگر فکر کنیم، می‌بینیم تمام جهان ما، از اتم‌ها و مولکول‌ها تشکیل شده و خود ما نیز. آیا این بدان معناست که ما تنها، امواج بزرگ احتمال هستیم؟

این تصور که هر چیزی در جهان ما، در صورت مشاهده نشدن، ماهیتی مستقل ندارد، انشتین را واداشت به شوخی بگوید: «ترجیح می‌دهم فکر کنم ماه، حتی وقتی نگاهش نمی‌کنم، باز وجود دارد.»

گربه‌ی شرودینگر (Schrödinger's Cat)

انشتین، تنها بنیانگذار نظریه‌ی کوانتوم نبود که به آن شک داشت. اِروین شرودینگر، یکی از معادلات کلیدی را برای پیش‌بینی چگونگی تغییر سیستم کوانتوم در طول زمان مطرح کرد. این کار برای او جایزه‌ی نوبل سال ۱۹۳۳ را به ارمغان آورد. با این حال، وی با بعضی از مفاهیم فیزیک کوانتوم، مشکل داشت و برای نشان دادن بی‌معنا بودن آن‌ها، مثالی مطرح کرد.

در آزمایش فرضی شرودینگر، یک گربه درون جعبه‌ای مهر و موم شده قرار می‌گیرد (توجه: این فقط یک مثال است، شرودینگر هرگز نمی‌خواست کسی این آزمایش را با یک گربه‌ی واقعی انجام دهد). در درون این جعبه، یک دستگاه «نابودگر» شامل یک ماده‌ی رادیواکتیو، یک شمارشگر گایگر مولر و یک ظرف شیشه‌ای قرار دارد. ماده‌ی رادیواکتیو به اندازه‌ای است که در عرض یک ساعت به احتمال ۵۰ درصد تجزیه شده، ذره‌ای آزاد می‌کند که باعث به کار افتادن شمارشگر می‌شود. شمارشگر نیز به گونه‌ای تعبیه شده که در صورت شناسایی ذره، چکشی را رها می‌سازد و موجب متلاشی شدن ظرف شیشه‌ایِ پر از گاز کشنده‌ی هیدروژن سیانید می‌شود.

بعد از گذشت یک ساعت، احتمال این که جعبه را باز کنید و گربه را زنده یا مرده بیابید، پنجاه/ پنجاه است. اما گربه پیش از باز کردن جعبه، در چه وضعیتی است؟ از آنجایی که نابودی اتم، رویدادی کوانتومی است، با توجه به تفسیر کپنهاگ، می‌توان گفت تا زمانی که اتم (به عنوان تابع موج احتمال)، مشاهده نشده، در حالت برهم نهی قرار دارد– یعنی همزمان در دو وضعیت است. معنایش می‌تواند این باشد که دستگاه نابودگر و گربه نیز در حالت برهم نهی هستند، گربه هم زنده است و هم مرده.

شرودینگر چنین ایده‌ای را مضحک یافت و تلاش کرد از آن، برای نشان دادن کاستی‌های نظریه‌ی کوانتوم، استفاده کند و بگوید این نظریه یا اشتباه است یا ناقص.

مسئله‌ی دیگری که فیزیکدانان اولیه‌ی حوزه‌ی کوانتوم را درگیر کرد، مسئله‌ی ناظری بود که تابع را در هم می‌شکست. ناظر کدام است؟ شکارشگر گایگر مولر؟ گربه؟ انسان آگاه آزمایشگر؟

از نظر عده‌ای، آگاهی به طرز غریبی با فیزیک کوانتوم در ارتباط می‌باشد. حال آن‌که برای بسیاری از فیزیکدانان، چنین دیدگاهی، همچون یک لعن و نفرین است. از زمانی که کوپرنیک، برای اولین بار، زمین را از مرکز منظومه‌ی شمسی برداشت و آن را تنها یکی از چند سیاره‌ای معرفی کرد که به دور خورشید می‌گردند، جایگاه انسان در کیهان، مرتب کوچک و کوچک‌تر شد، تا جایی که اکنون، سیاره‌ی ما، تنها، لکه‌ی کوچکی است در هستی وسیع و بی‌پایان. اگر مفاهیم کوانتوم با آگاهی در ارتباط مستقیم باشند، یعنی دانشِ پانصد سال باید زیر و رو شود. چیزی که فیزیکدانان از آن بیزارند.

آیا تفاسیر دیگری از نظریه‌ی کوانتوم وجود دارد که برای این مشکلات، پاسخی ارائه دهد؟ بله. ما در بخش‌های بعدی به آن‌ها می‌پردازیم. هر کدام از تفاسیر دارای نکته‌ای روشن‌گرانه است، اما نمی‌تواند به طور کامل از غرابت کوانتوم بگریزد.

فوتون‌های درهم‌تنیده، در هر فاصله‌ای از هم که قرار داشته باشند، حتی اگر چندین سال نوری از هم دور باشند، می‌توانند بلافاصله بر یکدیگر تأثیر بگذارند.

در قسمت پیشین، کاوش خود را در دنیای عجیب فیزیک کوانتوم آغاز کردیم. دنیایی که در آن، هر چیزی، فقط در صورتی وجود داشت که نگاهش می‌کردیم، دنیایی که در آن گربه‌ها می‌توانستند همزمان، هم مرده باشند و هم زنده. در این قسمت، به این موضوع خواهیم پرداخت که چگونه بر اساس برخی تفاسیر از فیزیک کوانتوم، هر چیزی در جهان، به صورت آنی، با تمام چیزهای دیگر در هر فاصله‌ای از آن که قرار داشته باشد، مرتبط است. (توجه: توصیه می‌شود پیش از خواندن قسمت دوم، حتماً قسمت اول را مطالعه کنید.)

سال ۱۹۲۷، شاهد آغاز مجموعه‌ای از مناظرات، میان دو تن از برجسته‌ترین دانشمندان جهان در آن روزگار بود: انشتین (Einstein)، نویسنده‌ی نظریه‌ی نسبیت عام و نیلز بور (Niels Bohr) ، یکی از اولین محققان در نظریه‌ی کوانتوم. نخستین برخورد میان این دو، در پنجمین کنفرانس بین‌المللی سلوی (Solvay Conference)، درباره‌ی الکترون‌ها و فوتون‌ها اتفاق افتاد، که در بروکسل بلژیک برگزار شده بود. تعداد شرکت‌کنندگان این کنفرانس اندک بود، اما همگی آنان، افراد برجسته‌ای بودند. از میان ۲۹ دانشمند حاضر در کنفرانس، ۱۷ نفر یا برنده‌ی جایزه‌ی نوبل بودند، یا این که بعدها صاحب نوبل شدند. ماری کوری، دو بار برنده‌ی جایزه‌ی نوبل شد.

اگرچه انشتین، از پایه‌گذاران تئوری کوانتوم بود، اما با آن مشکل داشت. یکی از مهم‌ترین توانایی‌های انشتین به عنوان یک دانشمند، توانایی طراحی آزمایشات فرضی (Thought Experiments) بود؛ آزمایشاتی که در دنیای واقعی، غیرممکن هستند، اما انجامشان در ذهن، می‌تواند روشنگر بخشی از ماهیت فیزیک باشد. (یکی از جالب‌ترین آزمایشات فرضی انشتین، این بود که اگر او بتواند دوچرخه‌اش را با سرعت نور براند، دنیا به چه شکلی دیده خواهد شد). با این حال، استفاده از این نوع آزمایشات فرضی، برای دستیابی به ماهیت حقیقی نظریه‌ی کوانتوم، ناامیدکننده بود. نتایج این آزمایش‌ها، غیرمنطقی به نظر می‌آمدند؛ اشیاء وجود نداشتند مگر آن‌که نگاهشان می‌کردید، گربه‌ها همزمان مرده و زنده بودند و اگر از مکان دقیق یک ذره (مثل فوتون) آگاهی داشتید، چگونگی حرکت آن مشخص نمی‌شد.

اما بور، با این مسئله، مشکلی نداشت. ظاهراً معماهای این تئوری، فکر بور را به خود مشغول نمی‌کرد، و او تنها به نتایج معادلات توجه داشت. همان طور که دیوید مرمین فیزیکدان گفت، رویکرد نیلز بور، آن‌گونه که در تفسیر کوپنهاگ معروفش از فیزیک کوانتوم بیان شده، به این صورت است: خفه شو و محاسبه کن!

شرکت‌کنندگان پنجمین کنفرانس بین‌المللی سلوی درباره‌ی فوتون‌ها و الکترون‌ها. انشتین، در اواسط ردیف اول نشسته است.

رویارویی بارز انشتین/بور زمانی شروع شد که انشتین، مثالی ارائه داد تا نشان دهد تئوری کوانتوم، یا اشتباه است یا ناقص. بور، عصر روز بعد، به تفکر درباره‌ی این مسئله پرداخت و فردای آن روز، پاسخی برای رد انتقاد انشتین، ارائه داد. این مباحثات زمانی بالا گرفت که در سال ۱۹۳۵، انشتین همراه با بوریس پودولسکی و نیتان روزن، مقاله‌ای ارائه کرده، در آن به توضیح مطلبی

پرداخت که به پارادوکس EPR مشهور شد.(Einstein- Podolsky- Rosen Paradox)

رفتاری غریب در فاصله

آزمایش فرضی انشتین در مقاله‌ی یاد شده، به این ترتیب است که یک ذره (ما می‌توانیم یک پیون را به عنوان مثال در نظر بگیریم) برداشته شده و باقی می‌ماند تا به دو فوتون (ذره‌های نور) تجزیه شود. این دو فوتون در دو جهت متفاوت به حرکت درمی‌آیند. از آنجایی که این دو فوتون، از یک پیون خارج شده‌اند، درهم‌تنیده‌اند(Entangled Photons) ، یعنی تابع موج یکسانی دارند. این دو فوتون، دارای چند ویژگی مکمل نیز هستند. برای مثال چرخش آن‌ها: پیون در ابتدا هیچ چرخشی نداشت، بنابراین، اگر یک فوتون، چرخشی رو به بالا بر محور x خود داشته باشد، فوتون دیگر، برای ایجاد تساوی، باید داری یک چرخش رو به پایین بر محور x خود باشد.

اما با توجه به تئوری کوانتوم، یک ویژگی تا زمانی که اندازه‌گیری نشده، وجود ندارد. بنابراین وقتی فوتون اول را اندازه می‌گیرید و می‌بینید چرخشی رو به بالا دارد، فوتون دیگر، بلافاصله باید چرخشی رو به پایین به خود بگیرد، حتی اگر یک سال نوری از فوتون اول فاصله داشته باشد. به عقیده‌ی انشتین و نویسندگان دیگر این مقاله، چنین چیزی منطقی نبود. یا فوتون‌ها در زمان جدا شدن از یکدیگر، اطلاعات مربوط به چرخش را با خود برده بودند، یا این که فوتون اول، هنگامی که مورد بررسی قرار گرفته، اطلاعات چرخش خود را بلافاصله با سرعتی بیشتر از سرعت نور، به فوتون دوم، که در فاصله‌ی بسیار دوری از آن قرار دارد، منتقل کرده است. انشتین این تأثیر را «رفتار غریب در فاصله» نامید.

از آنجایی که اطلاعات نمی‌توانند با سرعتی بیش از سرعت نور منتقل شوند، انشتین چنین استدلال کرد که فوتون‌ها، احتمالاً دارای «متغیرهای پنهان» هستند که از زمان به وجود آمدن فوتون‌ها، اطلاعات چرخش را شامل می‌شدند. در تئوری کوانتوم، چنین متغیرهایی وجود نداشتند، پس تئوری حتماً ناقص بود.

بل و برهان‌اش

مشکل «رفتار غریب در فاصله»ی انشتین، بعد از مرگ‌اش در سال ۱۹۵۵ و حتی پس از مرگ بور در سال ۱۹۶۲، حل‌نشده باقی ماند. درسال ۱۹٦٤، یک فیزیکدان ایرلندی به نام «جان بل (John Bell) «مقاله‌ای منتشر ساخت با عنوان «در باب مسئله‌ی متغیرهای پنهان در مکانیک کوانتوم». بل در ابتدا، این ایده‌ی انشتین را که احتمالاً متغیرهای پنهانی وجود دارد، تأیید کرد. وی در مقاله‌اش، آزمایشی ارائه کرد تا معلوم شود آیا متغیرهای پنهان می‌توانند دلیلی برای آنچه مشاهده شده باشند، یا نه.

جدال بور (چپ) و انشتین (راست)، تنها زمانی حل شد که بل این برهان را مطرح کرد و کلازر با انجام آزمایشی نشان داد که بور، درست می‌گفته است.

در آزمایش بل، دو ذره‌ی درهم‌تنیده، ایجاد شده و به سمت دو فرد فرستاده می‌شوند (به عنوان مثال آلیس و باب). سپس، این دو نفر، ذره‌ها را مورد آزمایش قرار می‌دهند تا ویژگی‌های مکمل آن‌ها مشخص شود. درک جزئیات آزمایش، دشوار است، اما بل توانست نشان دهد که طی آزمایشات متعدد، در صورت وجود ویژگی‌ها از ابتدا، تعداد دفعاتی که آلیس و باب نتایج یکسانی

گزارش می‌کنند، ، در مقایسه با وضعیتی که ویژگی‌ها در زمان بررسی و اندازه‌گیری فوتون اول، ایجاد شوند، متفاوت خواهد بود. بل تصور می‌کرد پس از آن که برهانش را (که اغلب به دلیل یکی از پیش‌بینی‌هایش «نادرستی بل» خوانده می‌شود) منتشر کند، سال‌ها طول خواهد کشید تا کسی بتواند در آزمایشی واقعی، آن را امتحان کند. اما تنها یک سال بعد، یکی از فارغ‌التحصیلان متهور دانشگاه کلمبیا، «جان کلازر (John Clauser) «توانست صورت ساده‌ای از این آزمایش را انجام دهد. او نشان داد رفتار فوتون‌ها مطابق همان چیزی است که توسط فیزیک کوانتوم پیش‌بینی شده، نه آنچه که از تئوری «متغیر پنهان» انتظار می‌رود. یک دانشمند دیگر به نام «آلن اسپکت (Alen Aspect) «بعدها طی آزمایشاتی با دقت و صحت بیشتر، ثابت کرد برخلاف تردیدهای انشتین، بی‌شک «رفتار غریب در فاصله» در جهان کوانتوم وجود دارد.

کار علمی بل، در حوزه ی تجربی، سرآغازی بود برای آنچه که تصور می‌شد بیشتر موضوعی است فلسفی. وی چنان تأثیر به سزایی داشت که «هنری استپ (Henry Stapp) «از لابراتوار لورنس برکلی کالیفرنیا، عملکرد بل در حوزه‌ی فیزیک کوانتوم را «ژرف‌ترین کشف علمی» نام نهاد.

تفسیر بوهم

بل، علی‌رغم این که خود، صحت تئوری کوانتوم را اثبات کرده بود، اما به دلیل وابستگی تفسیر استاندارد کپنهاگ به مشاهده، برای شکستن تابع موج و حقیقی شدن یک ذره (و به همان ترتیب یک گربه)، از این تفسیر پشتیبانی نمی‌کرد. بل، تفسیر ارائه شده توسط دیوید بوهم (David Bohm) فیزیکدان را منطقی‌تر یافت. برای درک تفسیر بوهم، بازگشت به مثالمان در قسمت اول درباره‌ی نگاه کردن به ستاره‌ی اپسیلون جبار در برج شکارچی، می‌تواند کمک شایانی باشد. در بحث خود درباره‌ی تفسیر کوپنهاگ، دیدیم که یک فوتون- یک ذره‌ی نور- در واقع اپسیلون جبار را ترک نمی‌کند، بلکه، این موج احتمال است که به چشمان ما می‌رسد. در تفسیر بوهم، فوتونی واقعی، که توسط یک نیروی «پتانسیل کوانتوم» هدایت می‌شود، از ستاره بیرون می‌آید. این فوتون، مثل چراغ دریایی، در زمان به عقب برمی‌گردد تا ذره را به ما برساند. طبق تفسیر بوهم، همه چیز در دنیا به چیزهای دیگر مرتبط است. در این تفسیر، برخلاف تفسیر کوپنهاگ، نیازی به تابع موج نیست تا به محض دیده شدن، بشکند. با این حال، این تفسیر نیز، خالی از ایراد نیست. اگرچه تفسیر بوهم جبرگرایانه است، یعنی با اطلاعات کافی می‌توان هرچیزی را که در جهان اتفاق خواهد افتاد را از آغاز پیش‌بینی کرد، اما برای حرکت به عقب در زمان و طی یک فاصله‌ی بسیار زیاد، به اطلاعات نیاز هست. به همین دلیل، تفسیر بوهم، طرفداران چندانی میان دانشمندان نداشته است.

تفسیر «دنیاهای چندگانه«

طبق تفسیر دنیاهای چندگانه، جهان دو شاخه می‌شود و گربه‌ی شرودینگر، در یک جهان می‌میرد و در دیگری زنده می‌ماند. شاید مهم‌ترین جایگزین برای تفسیر کپنهاگ در میان فیزیکدانانی که نظریه‌ی کوانتوم را مطالعه می‌کنند، تفسیر دنیاهای چندگانه (the "Many Worlds" interpretation)باشد. دانشمندان برجسته‌ای همچون استیون هاوکینگ (Stephen Hawking)و ریچارد فاینمن (Richard Feinman) از طرفداران تفسیر دنیاهای چندگانه هستند و روز به روز به حامیان این تفسیر اضافه می‌شود. تفسیر دنیاهای چندگانه، توسط هیو اِورِت سوم (Hugh Everett III) ، فارغ‌التحصیل دانشگاه

پرینستون، در ابتدا با نام «فرمول‌بندی حالت نسبی (the "relative state" formulation)» ارائه شد.

اورت می‌گوید تابع موج، هرگز از بین نمی‌رود. این ایده، آزمایش فرضی گربه‌ی شرویدینگر را گسترش می‌دهد. این فقط گربه نیست که در دو حالت زنده و مرده قرار دارد، بلکه دانشمندی که آزمایش را انجام می‌دهد نیز به دو دانشمند تبدیل می‌شود که یکی گربه‌ی مرده را می‌بیند و دیگری، گربه‌ی زنده را. این دوشاخه شدن، تنها به آزمایش «گربه» محدود نمی‌شود، بلکه درباره‌ی تمام نتایج ممکن پدیده‌های کوانتومی برای هر ذره‌ای، صدق می‌کند. بر اساس این تفسیر، جهان، همچون درختی عظیم که هر شاخه‌اش، دو شاخه می‌شود، مرتباً در حال تکثیر به نسخه‌های متفاوت بی‌شمار است. جهان‌هایی موازی وجود دارند که تنها اندکی با جهان ما متفاوت‌اند و جهان‌های دیگری هم هستند که با جهان ما، تفاوت عمده‌ای دارند.

در واقع، بر اساس نتیجه‌ی منطقی تفسیر دنیاهای چندگانه، هر چیزی که امکان‌پذیر است، هر قدر هم نامحتمل باشد، در نسخه‌ای از جهان، وجود دارد. در یک جهان، شما رئیس جمهور ایالات متحده هستید و در دیگری، به خاطر کشتار جمعی، در زندان به سر می‌برید. ایده‌ی وجود همه‌چیز، اگرچه عجیب به نظر می‌رسد، اما یکی از تعابیری است که حامیان پر و پا قرصی دارد. مکس تگمارک (Max Tegmark) ، کیهان‌شناس، که بر اساس همین تفسیر، سلسله مراتب سطوح دنیاهای چندگانه را طراحی کرده، معتقد است توضیح مجموعه‌ای از جهان‌ها (گاه آن را چندگیتی multiverse نیز می‌نامند) که در آن‌ها هر چیزی ممکن است، آسان‌تر از توضیح یک جهان با قوانین مشخص است.«ویژگی مشترک هر چهار سطح چندگیتی، این است که ساده‌ترین و ظریف‌ترین نظریه، اساساً دنیاهای موازی را شامل می‌شود. برای انکار وجود این دنیاها، باید با اضافه‌کردن فرض‌های فاقد عمومیت و فرایندهایی که اساس تجربی ندارند، تئوری را پیچیده کنیم: فضای متناهی، از بین رفتن تابع موج و عدم تقارن هستی‌شناسانه. به این ترتیب، در نهایت، رأی ما به جایی می‌رسد که به نظرمان بی‌فایده‌تر و ناهنجارتر است: دنیاهای چندگانه، یا کلمات چندگانه«.

مکس تگمارک، کیهان‌شناس، طراح سلسله مراتب دنیاهای چندگانه.

تفسیر دنیاهای چندگانه، به یکی از دشوارترین پرسش‌های فلسفی کسانی که به ساخت ماشین زمان اندیشیده‌اند، پاسخ می‌دهد. اگر تنها یک جهان وجود داشته باشد، بازگشت به گذشته با ماشین زمان، و کشتن پدربزرگتان، باعث ایجاد پارادوکس خواهد شد. اما اگر دنیاهای چندگانه‌ی چندگیتی، وجود داشته باشند، دیگر پارادوکسی در کار نیست. در این صورت، کشتن پدربزرگتان، فقط باعث به وجود آمدن گذشته‌ی متفاوتی خواهد شد که شما در آن حضور ندارید. در شاخه‌ی دیگری از گذشته، پدربزرگتان زنده می‌ماند و شما متولد می‌شوید. اگر به شاخه‌ی اصلی خود برگردید، پدربزرگتان همچنان زنده خواهد بود. اگر در گذشته‌ی دیگر، که در آن پدربزرگتان را کشته‌اید، باقی بمانید، وجودی غریب خواهید شد بی هیچ گذشته‌ای.

به جز تفسیر کپنهاگ، بوهم و دنیاهای چندگانه، تفاسیر دیگری نیز از فیزیک کوانتوم وجود دارد. با این حال، به نظر می‌رسد تمام آن‌ها در نوعی «غرابت»، با هم مشترک‌اند. هنوز هم فیزیکدانان، بر سر این که کدام یک از این تفاسیر درست است، یا این که اصلاً این تفاسیر درست هستند یا نه، با هم اختلاف نظر دارند. راه حل این مسئله، در دست فیزیکدان باهوشی است که برای اثبات یا رد این تفاسیر، آزمایشی طرح کند.

به هر حال، در پایان، از ایده‌هایی که هنوز قابل آزمودن نیستند، فاصله می‌گیریم و به آزمایشی می‌پردازیم که در چندین

آزمایشگاه، تکرار شده است. یکی از زیباترین آزمایشاتی که تا کنون انجام شده: پاک‌کننده‌ی کوانتوم انتخاب تأخیردار (The Delayed Choice Quantum Eraser).

آزمایش پاک‌کننده‌ی کوانتوم انتخاب تأخیردار

در آزمایش اولیه‌ی دو شکاف، دیدیم در صورت مشخص بودن اطلاعات مربوط به «کدام مسیر» که معلوم می‌کند فوتون از کدام شکاف عبور کرده، الگوی تداخل ناپدید می‌شود، زیرا فوتون به جای آن‌که موجی عمل کند، به صورت ذره‌ای عمل می‌کند.

آزمایش پاک‌کننده‌ی کوانتوم انتخاب تأخیردار، که برای نخستین بار توسط Yoon-Ho Kim ، R. Yu، S. P. Kulik، Y. H. Shih و Marlan O. انجام شد، ساختاری مشابه آزمایش دو شکاف دارد. با این تفاوت که درست پشت شکاف‌ها (آن‌ها را شکاف‌های A و B می‌نامیم)، یک کریستال بتا باریوم بورات beta barium borate(BBO) قرار می‌گیرد. وقتی یک فوتون به این کریستال برخورد می‌کند، کریستال، دو فوتون با انرژی کمتر آزاد می‌کند که درهم‌تنیده هستند (تابع موج یکسانی دارند). یکی از فوتون‌ها (که فوتون سیگنال signal photon نام دارد) به سمت یک ردیاب (این ردیاب را هم D۰ می نامیم) می‌رود تا موقعیت‌اش شناسایی شود. هر دو مسیر، از شکاف A و شکاف B به ردیاب D۰ می‌رسند، تا با رسیدن فوتون‌های بیشتر، این اطلاعات برای دریافتن این که آیا فوتون طبق الگوی تداخل رفتار می‌کند یا نه، مورد استفاده قرار گیرد. درست مثل آزمایش دو شکاف اصلی.

فوتون درهم‌تنیده با فوتون سیگنال (که فوتون متأخر idle photon نام دارد)، در جهت دیگری حرکت می‌کند. این فوتون نیز می‌تواند مانند فوتون سیگنال، در دو مسیر متفاوت A) و (B حرکت کند، یعنی هرکدام از یکی از شکاف‌ها عبور کنند. آزمایش، به گونه‌ای طراحی شده تا مسیرهای فوتون متأخر، بسیار طولانی‌تر از مسیرهای فوتون سیگنال باشند. یعنی تا زمانی که فوتون متأخر، به یکی از دستگاه‌های اپتیکال برخورد کند، فوتون سیگنال به ردیاب D۰ رسیده و ثبت شده است. فوتون متأخر، ابتدا به دو پرتوشکاف (می‌توانیم آن‌ها را BSA و BSB بنامیم، برای هر مسیر یکی). پرتوشکاف، دستگاهی اپتیکال است که ٪۵۰ احتمال دارد مثل یک تکه شیشه، فوتون را از خود عبور دهد و ٪۵۰ احتمال دارد مثل آینه، آن را منعکس کند. اگر فوتون از پرتوشکاف منعکس شود، بسته به این که مسیر A را طی کند یا مسیر B را، به یکی از دو ردیاب (ما این ردیاب‌ها را D۳ و D٤ می‌نامیم) برخورد خواهد کرد. اگر فوتون‌ها، از پرتو شکاف بگذرند، به آینه‌هایی برخورد می‌کنند که آنان را به سمت یک پرتوشکاف نهایی انعکاس می‌دهد. در اینجا، فوتون‌های یک مسیر، ممکن است عبور کنند تا به ردیاب D۱ برخورد کنند، یا منعکس شوند تا به ردیاب D۲ برخورد کنند. فوتون‌هایی که از مسیر دیگر می‌گذرند، درست عکس این عمل می‌کنند، یعنی در صورت عبور به D۲ برخورد می‌کنند و در صورت منعکس شدن به D۱.

ساختار آزمایش پاک‌کننده‌ی کوانتوم انتخاب تأخیردار BS .نشانگر پرتوشکاف، Mنشانگر آینه و D نشانگر ردیاب است. (تحت امتیاز پاتریک ادوین و مشترکین ویکی‌پدیا)

حاصل این قرارگیری، چنین است که اگر یک فوتون، توسط پرتوشکاف اول منعکس شود، در D۳ و D٤ ردیابی خواهد شد و اطلاعات مربوط به «کدام مسیر» درباره‌ی این که این فوتون و فوتون درهم‌تنیده‌اش، از کدام شکاف عبور کرده‌اند، به دست

خواهد آمد. اما اگر فوتون از پرتوشکاف‌های اول عبور کند، پرتوشکاف نهایی نمی‌تواند مسیرها را درست تشخیص دهد. بنابراین، ما می‌فهمیم که فوتون به D۱ و D۲ رسیده، اما نمی‌دانیم این فوتون و فوتون درهم‌تنیده‌اش، در چه مسیری از دستگاه دوشکاف عبور کرده است.

تمام ردیاب‌ها، به دستگاهی به نام «شمارشگر همرویداد (coincidence counter)» متصل‌اند که برخورد و موقعیت فوتون سیگنال در D۰ را با فوتون متأخر در D۱ ، D۲، D۳و D٤ انطباق می‌دهد. شمارشگر رویداد، برای جلوگیری از تأثیرگذاری فوتون‌های نامناسب بر آزمایش، به کار می‌رود. تمام فوتون‌هایی که به BBO برخورد می‌کنند، زوج درهم‌تنیده به وجود نمی‌آورند. به همین دلیل، فوتون‌های درهم‌تنیده‌ی بسیاری وجود خواهند داشت که باید از داده‌های نهایی کنار گذاشته شوند. هنگامی که اطلاعات به دست آمده از این آزمایش، مورد مطالعه قرار گرفتند، نتایج بسیار جالبی مشاهده شد. اگر یک فوتون متأخر، به D۳ یا D٤ برخورد کند، می‌توانیم بفهمیم که این فوتون و فوتون درهم‌تنیده‌اش، از کدام شکاف عبور کرده‌اند و می‌بینیم که این فوتون، از الگوی تداخل، پیروی نکرده است. اگر فوتون‌های سیگنال، از D۰ با فوتون‌های درهم‌تنیده‌شان از D۱ انطباق داده شوند، الگوی روشن تداخل، مشاهده می‌شود. زیرا نمی‌دانیم فوتون از کدام شکاف عبور کرده است. با بررسی D۰ و D۲هم به نتایج یکسانی می‌رسیم، زیرا در اینجا هم نمی‌دانیم فوتون از کدام شکاف عبور کرده است (اگرچه در این مورد دوم، به دلیل ویژگی‌های اپتیکال آخرین پرتو شکاف، الگوی تداخل، اندکی با الگوی D۰/D۱ تفاوت دارد.)

بازگشت در زمان؟

نکته‌ی جالب توجه درباره‌ی آزمایش پاک‌کننده‌ی کوانتوم انتخاب تأخیردار، این است که فوتون‌های سیگنال و متأخر، هیچ کدام، در برخورد فیزیکی با تجهیزات آزمایشگاهی رفتار متفاوتی از خود نشان نمی‌دهند، حال چه الگوی تداخل ظاهر بشود، چه ظاهر نشود. در آزمایش اصلی دو شکاف، می‌توان گفت ردیابی که عبور فوتون از شکاف بررسی می‌کرد، به نحوی با فوتون برخورد فیزیکی داشت و باعث می‌شد فوتون، رفتار موجی خود را به رفتار ذره‌ای تبدیل کند. در اینجا، تصمیم درباره‌ی این که آیا فوتون سیگنال با خود تداخل خواهد کرد یا نه، تنها بر پایه‌ی این مسئله قرار دارد که بعد از برخورد فوتون متأخر، اطلاعات مربوط به این که فوتون از کدام شکاف عبور کرده، همچنان موجود باشد. از آن‌جایی فوتون متأخر، به طور مشخص، بعد از رسیدن فوتون سیگنال به ردیابش، به ردیاب خود می‌رسد، این طور به نظر می‌آید که اطلاعات «پاک می‌شوند». انگار چیزی در زمان به عقب برمی‌گردد و گذشته را تغییر می‌دهد. آیا واقعاً این اتفاق روی می‌دهد؟

اگر از نقطه‌نظر محض تفسیر کپنهاگ نگاه کنیم، احتمالاً نه. فوتون سیگنال، وقتی به ردیاب D۰ می‌رسد، در حالت برهم‌نهی است. این فوتون، هم از الگوی تداخل پیروی کرده و هم از آن پیروی نکرده. وقتی فوتون سیگنال، به ردیاب برخورد می‌کند، تابع موج خود را با تابع D۰ درهم می‌تند و به این شکل، ردیاب را نیز در حالت برهم‌نهی قرار می‌دهد. تابع موج، تنها در صورتی در یک موقعیت، یا موقعیت‌های دیگر از بین می‌رود که فوتون متأخر، به ردیابش برسد و مشاهدات پایان یابد. البته هنوز بر سر این که چه چیزی یا چه کسی مشاهدات را پایان می‌بخشد (انسان یا دستگاه) اختلاف نظر هست، هرچند به نظر می‌رسد ردیاب D۰ به تنهایی ناظر و مشاهده‌کننده محسوب نمی‌شود.

از دیدگاه کسانی که به تفسیر دنیای چندگانه، اعتقاد دارند، برهم‌نهی هرگز از بین نمی‌رود، و جهان، همراه با دانشمندانی که آزمایش را انجام می‌دهند، به چهار نسخه تبدیل می‌شود، هر نسخه برای هرکدام از ردیاب‌ها که فوتون متأخر می‌تواند به آن‌ها برخورد کند. هرکدام از دانشمندان، در دنیای خودشان، گمان خواهند کرد که برخورد فوتون متأخر به ردیابش، گذشته را تغییر داده است، حال آن‌که در حقیقت، این مسئله، معلول چهار شاخه شدن جهان است.

این بود نگاهی گذرا و محدود به غرابت کوانتوم. هم‌اکنون، دانشمندان، تا حد زیادی اطمینان دارند که تئوری کوانتوم درست است، اما هنوز بر سر این که کدام تفسیر را باید پذیرفت، با یکدیگر اختلاف نظر دارند. آیا مشاهدات ما، دنیای اطرافمان را به وجود می‌آورند، یا ما تنها نقاط ریزی هستیم در چندگیتی که تمام گذشته‌های ممکن را شامل می‌شود؟ آیا احتمال دیگری هم وجود دارد؟ هیچ کس به طور یقین نمی‌داند.

سال‌های سال، فیزیکدانان از پاسخ دادن به این پرسش‌ها، خودداری کرده‌اند و غرابت فیزیک کوانتوم، همان طور که .J. M. Jauch نویسنده و دانشمند، گفته است، همچون «اسکلتی است داخل گنجه». اخیراً افراد زیادی به این حوزه علاقه‌مند شده‌اند و تحقیق درباره‌ی معنای فیزیک کوانتوم، ارج و قرب بیشتری یافته است. امید است که این تلاش‌ها، پاسخ‌های بیشتری برای پرسش‌هایی که به نظر می‌رسد پیچیده‌ترین پرسش‌های جهان باشند، به ارمغان آورد.